

研究報告 8

ESR エコー実験のためのミリ波伝送用システム設計

**Design of millimeter wave transmission system
for an ESR echo experiment**

尾関 隆則, 酒井 俊彦, 立松 芳典, 山口 裕資, 桑山 一政, 竹内 太郎,
光藤 誠太郎, 藤井 裕, 小川 勇, 出原 敏孝, 斉藤 輝雄

*T. Ozeki, T. Sakai, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, K. Kuwayama, T. Takeuchi,
S. Mitsudo, Y. Fujii, I. Ogawa, T. Idehara, T. Saito*

福井大学遠赤外領域開発研究センター

Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

Abstract

Gyrotron FU CW VIIA has been developed as a radiation source for the ESR echo experiment. For the experiment, the output beam radiated from the gyrotron should be converted to a linear polarized Gaussian beam and be transmitted to the ESR experimental system. A Vlasov launcher was adopted as the convertor to the Gaussian beam. To increase the conversion efficiency to the Gaussian beam, high mode purity at the launcher entrance is required. The mode purity has been evaluated by radiation pattern measurement by using an IR camera and mode analysis. From the measurement, it was found that $TE_{0,2}$ mode, the oscillation mode at the cavity, is dominant at the gyrotron window. However, mode conversion occurs in the waveguide after the window and $TE_{2,2}$ mode becomes dominant at the launcher entrance. A Vlasov launcher for $TE_{2,2}$, instead of that for $TE_{0,2}$, has been manufactured and applied to the convertor. With this launcher, the electromagnetic wave has been well converted and a strong beam with a round cross section has been radiated from it.

1. はじめに

福井大学遠赤外領域開発研究センターでは ESR エコー (Electron Spin Resonance Echo) 実験に利用する光源として Gyrotron FU CW VIIA の開発を進めている。ESR とは、有機分子のラジカル電子や遷移金属イオンを含む化合物などの不対電子をもつ物質に適用される分光的測定方法である。電子スピンのエネルギー準位間のエネルギー差 ΔE に応じた振動数 ν ($h\nu = \Delta E$, h はプランク定数) をもつ電磁波を照射すると、エネルギー準位間の遷移が引き起こされる。これを共鳴と呼ぶ。共鳴を観測し、有機分子のラジカル電子や遷移金属イオンを含む化合物などの不対電子をもつ物質の電子スピンの状態を調べる測定方法が ESR エコーである。特に、パルス波を用いて電子スピンを $\pi/2$ 回転させ、次に π 回転させ、その後の電子スピン緩和にともない放出される電磁波を計測し、電子スピンの緩和時間を知る方法が ESR エコー実験である。

ジャイロトロンから出力した電磁波を離れた ESR 実験装置まで伝送し、照射するシステムを設計する。ESR エコー実験に用いるパルス波としては直線偏波のガウスビームを使用することが好ましい。しかし、Gyrotron FU CW VIIA では、共振器で発振した電磁波モードがテーパ導波管内を伝送して、そのままジャイロトロン窓から放射される。このような導波管モードそのままの放射では、電磁場の空間分布は軸上がゼロであったり、方位角方向にいくつかのピークがあったりする。また、直線偏波にもなっていない。このため、伝送にも試料への入射にも不向きである。ESR 装置まで導波管を用いて電磁波を伝送する場合でも、高次の電磁波モードはモード変換が起きやすく、伝送効率の低下が著しくなる。この点、ガウスビームは、直線偏波の収束電磁波ビームであり、応用する場合に便利である。

ジャイロトロンを ESR エコー実験に用いるためにはジャイロトロンから放射される電磁波をガウスビームに変換した後、ESR エコー装置まで伝送させる

伝送システムを開発することが現在の課題である．ガウスビームへの変換はジャイロトロンの外で行い，変換にはブラゾフランチャーを使用する．

ブラゾフランチャーとは，準光学放射器と収束ミラーよりなる簡便なシステムであり，ある 1 つの導波管モードを，ひさしを持つ導波管から放射し，放物鏡で反射することで幾何光学上すべての反射ビームの位相が揃った直線偏波の平行ビームに変換することができる．この平行ビームを複数枚のミラーで整形することでガウスビームとして ESR エコー

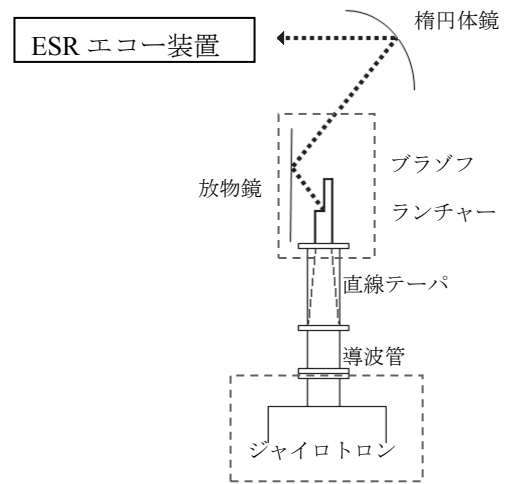


図 1-1 伝送図

装置まで伝送する．伝送図を図 1-1 に示す．ランチャー形式は真空窓の上に導波管，直線テーパ，ブラゾフランチャーの順に接続するものになっている．

ブラゾフランチャーは 1 つの導波管モードに対して直線偏波の平行ビームに変換できるものであるため，Gyrotron FU CW VIIA から放射されるビームが単一の導波管モードから成ることが要求される．しかし，真空窓からの放射パターンを測定した結果，発振モードから予測される放射パターンとはパターン形状が異なっていた．さらにランチャーの一部である導波管を接続して同様に放射パターンを測定した結果，真空窓からの放射パターンと異なる放射パターンを観測した．真空窓における純度の高い導波管モードを特定しなければ，ブラゾフランチャーを製作できないので開口における導波管モードの特定を行う．導波管モードはモードによって導波管内で固有の電磁界構造をもつ．導波管モードを導波管開口から自由空間に放射すれば導波管内での電磁波構造を反映した放射パターンをもつビームとなって放射される．逆にこの放射パターンを測定すれば開口での電磁界に含まれる導波管モードを評価できる．まず，真空窓からの放射パターンの評価をしてから，ランチャーの一部である導波管から

の放射パターンの評価をする．評価した導波管モードの割合が高いモード用のブラゾフランチャーでガウスビームに変換する．

2．Gyrotron FU CW VIIA の仕様

ジャイロトロン装置は，大きく分けてジャイロトロン管及び 8T 超伝導マグネット，補助磁場コイル，各種電源から成っており，8T マグネットは中央の大きな円筒状のクライオスタット内に含まれる．マグネットはヘリウムフリータイプであり，超伝導状態にするためにコンプレッサによって冷却している．ジャイロトロン管は下から順に電子銃，共振器，コレクタ，真空窓から構成されている．

実験には発振周波数 154 GHz，発振モード $TE_{0,2}$ モードの電磁波を使用する．実験条件は主磁場強度 $B = 5.66$ T, カソード電圧 $V_k = -12$ kV，補助磁場コイル電流 $I = 101.0$ A である．

3．放射パターン測定方法

Gyrotron FU CW VIIA の真空窓からの放射パターンを赤外線カメラで撮影することで電磁波構造を測定する．測定時のジャイロトロンにおける発振周波数は 154 GHz，発振モードは $TE_{0,2}$ モードである．図 3-1，3-2 に放射パターン測定に用いた実験装置の位置関係を示す．真空窓から距離 D の位置に吸収板である厚さ 1 mm の塩化ビニール板を真空窓に平行に設置し，真空窓とは反対側から赤外線カメラを用いて吸収板上の温度上昇分布 $\Delta T(x,y)$ を測定する．次に，ランチャーを着けたときにモード変換が起きていないか確認するために，真空窓の上につけたランチャーの一部である 100 mm 長の導波管開口からの放射パターンも同様に撮影する．

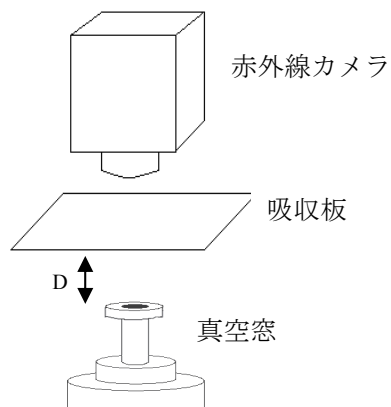


図 3-1 真空窓からの測定方法

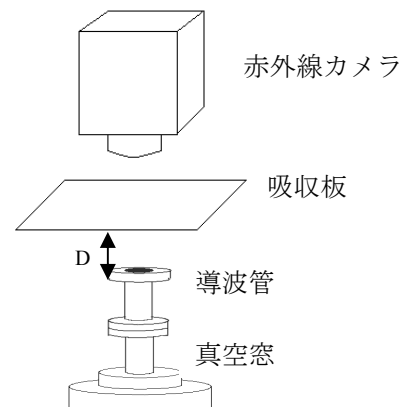


図 3-2 導波管からの測定方法

4. 測定結果

図 3-1 の状態で真空窓と吸収板間距離 100 mm において測定した放射パターン図を図 4-1 に示す．図 4-1 から $TE_{0,2}$ モードから予想される放射パターンと異なることが分かる．一見円が二つ内側と外側にあるように見える．また図 3-2 の状態で導波管と吸収板間距離 100 mm において測定した放射パターン図を図 4-2 に示す．図 4-1 と図 4-2 のパターン形状が違うことがわかった．これにより，図 4-1 と同様に図 4-2 で導波管開口における導波管モードの評価もする必要がある．

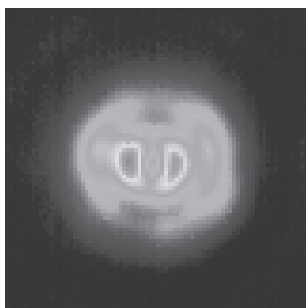


図 4-1 真空窓からの放射パターン

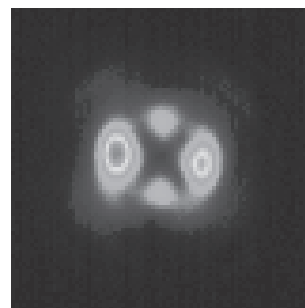


図 4-2 導波管からの放射パターン

5. モード成分の評価方法

吸収板での電磁場分布の計算方法を考える．導波管モードには回転の向きが異なる 2 つの回転モードが存在する．真空窓直前, または導波管開口において単一の $TE_{m,n}$ モードで存在し,

その電場，磁場がそれぞれ $\mathbf{E}'_{m,n}, \mathbf{H}'_{m,n}$ であるとき，吸収板上での電場 $\mathbf{E}^{\pm}_{m,n}$ ，磁場 $\mathbf{H}^{\pm}_{m,n}$ は，

$$\mathbf{E}^{\pm}_{m,n} = \int_S \{ -j\omega\mu(\mathbf{n} \times \mathbf{H}'_{m,n})\psi + (\mathbf{n} \times \mathbf{E}'_{m,n}) \times \nabla\psi + (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}'_{m,n})\nabla\psi \} dS \quad (5-1)$$

$$\mathbf{H}^{\pm}_{m,n} = \int_S \{ j\omega\mu(\mathbf{n} \times \mathbf{E}'_{m,n})\psi + (\mathbf{n} \times \mathbf{H}'_{m,n}) \times \nabla\psi + (\mathbf{n} \cdot \mathbf{H}'_{m,n})\nabla\psi \} dS \quad (5-2)$$

と表わすことができる．ここで，+は左回りのモード，-は右回りのモードを表す．また，

$$\psi = \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \text{である.}$$

真空窓または，導波管開口で複数の導波管モードが混在する場合は，吸収板上での全電場 \mathbf{E} ，全磁場 \mathbf{H} は，次のような足し合わせによって表すことができる．

$$E_x = \sum C_{m,n}^+ E_{x_{m,n}}^+ + \sum C_{m,n}^- E_{x_{m,n}}^- \quad (5-3)$$

$$E_y = \sum C_{m,n}^+ E_{y_{m,n}}^+ + \sum C_{m,n}^- E_{y_{m,n}}^- \quad (5-4)$$

$$H_x = \sum C_{m,n}^+ H_{x_{m,n}}^+ + \sum C_{m,n}^- H_{x_{m,n}}^- \quad (5-5)$$

$$H_y = \sum C_{m,n}^+ H_{y_{m,n}}^+ + \sum C_{m,n}^- H_{y_{m,n}}^- \quad (5-6)$$

ここで $|C_{m,n}^{\pm}|^2$ は各モードの成分比を表す．ポインティングベクトル $\mathbf{P}(x,y)$ は，

$$\mathbf{P}(x,y) = \frac{1}{2} \text{Re} \mathbf{E}(x,y) \times \mathbf{H}^*(x,y) \quad (5-7)$$

である．

複数の導波管モードが混在しても含まれるモードによって固有の放射パターンを示す^[1]．

このことを利用して，放射パターン測定から導波管開口(あるいは真空窓)に含まれるモード成分の割合を評価できる．吸収板は薄いため実験で得られた塩化ビニール板の温度上昇分布 $\angle \mathbf{T}(x,y)$ は式(5-7)のポインティングベクトル $\mathbf{P}(x,y)$ の分布に等しいと考えることができる．したがって，式(5-3)～(5-6)の $C_{m,n}^{\pm}$ を変て吸収板上の電場 \mathbf{E} ，磁場 \mathbf{H} を計算し，ポインティングベクトルの $\mathbf{P}(x,y)$ 分布を求め，それを温度上昇分布 $\angle \mathbf{T}(x,y)$ と比較し，測定で得られた $\angle \mathbf{T}(x,y)$ 分布を再現するような $C_{m,n}^{\pm}$ の値の組み合わせを求めることで導波管モードの成分の割合を次式で評価する．

$$\text{TE}_{m,n} \text{ モードの割合 (\%)} = \frac{|c_{m,n}^+|^2 + |c_{m,n}^-|^2}{\sum_{i=1, j=1}^{\infty} \{|c_{i,j}^+|^2 + |c_{i,j}^-|^2\}} \times 100 \quad (5-8)$$

6. モード成分の評価結果

6-1. 真空窓の場合

真空窓の開口で何モードの割合が最も高いか評価するため、放射パターンの計算結果と実験結果を比較する。実験結果の図 4-1 から分かるように円周方向に節を持つパターン結果になっているので、放射パターンの計算結果と実験結果を比較するために放射パターンの中心からある半径の円に沿った方位角に対する分布を比較する。図 6-1, 6-2 にその結果を示す。図 6-1 は横軸に内側の輪の強いピークが見られる半径位置(図 6-1a,b に示す円)での方位角 θ , 縦軸にこの円に沿った実験での温度上昇分布 $\angle T$, 及び $C_{0,2} : C_{m,n}^+ : C_{m,n}^-$ を $1 : p : p$ として割合を変えた計算でのポインティングベクトル \mathbf{P} をとったグラフを示す。図 6-2 は横軸に外側の輪の強いピークが見られる半径位置(図 6-2a,b に示す円)での方位角 θ , 縦軸に測定で得られた温度上昇分布 $\angle T$, 及び計算でのポインティングベクトル \mathbf{P} をとったグラフを示す。 θ は図 6-1a,b, 6-2a,b に示す 0° 下ら反時計回りに増大するようにとった。

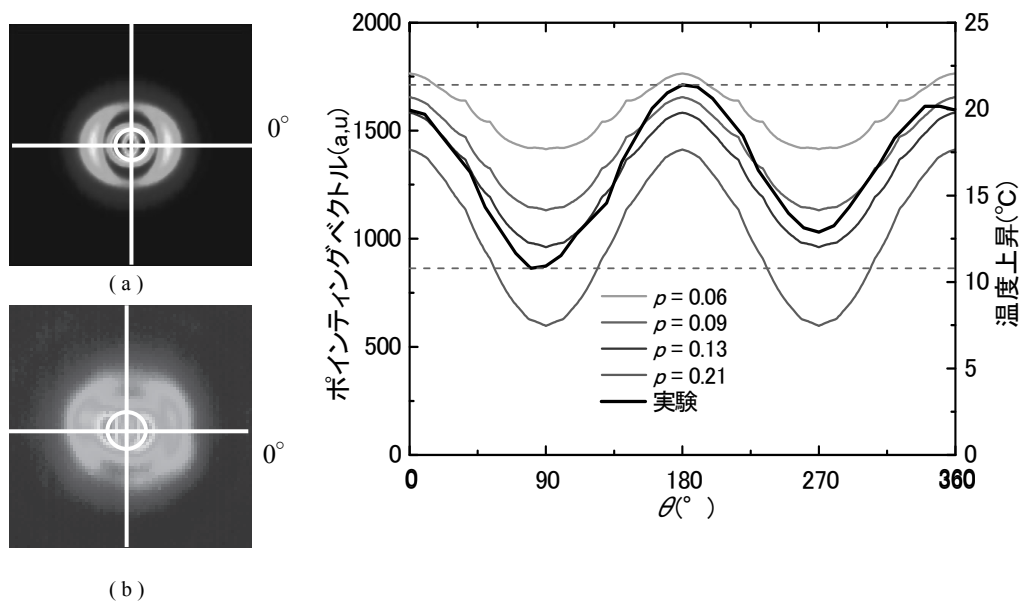


図 6-1 放射パターンの中心からある半径の方位角に対する分布の比較(1), (a)計算結果, (b)実験結果

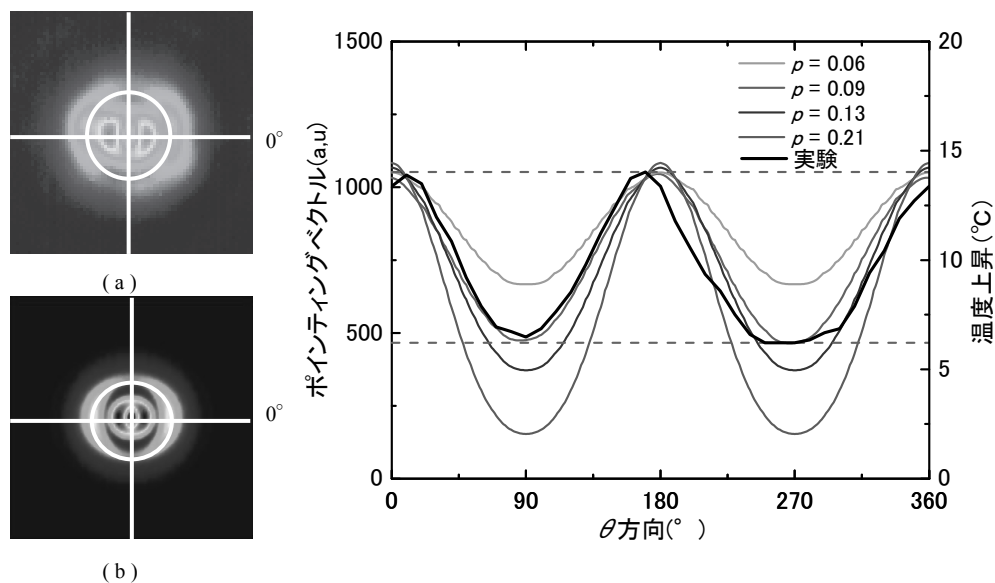


図 6-2 放射パターンの中心からある半径の方位角に対する分布の比較(2), (a)実験結果, (b)計算結果

図 6-1, 6-2 から $p = 0.09$ のときの計算結果が測定結果に近いことが分かる. (5-8)を用いて真空窓直前での導波管モードの割合を評価すると, $TE_{0,2}$ モードが 98%, $TE_{2,2}$ モードが 2%となる. これより, 真空窓からの放射パターンは $TE_{0,2}$ モードが支配的であると考えられる.

6 - 2 . 導波管 の 場 合

6 - 1 と同様にして導波管開口からの放射パターン測定における導波管モードの成分の割合を調べる. 図 4-2 の実験の放射パターンは 4 つのピークにそれぞれ強弱があり, 強い 2 つのピークが 180° の位置にある. この 4 つのピークの比を取り, 比の関係が近くなるように様々なモードを選んで割合を変えて放射パターンの計算をした. 図 6-3 は実験結果図 4-2 と放射パターン計算結果を中心からある半径の円に沿った方位角に対する分布を示したものである. 図 6-3 から放射パターンの計算結果はグラフの谷にあたる値が少し測定結果より低いですがピークの値は等しくなっていることがわかり, 測定した放射パターンにほぼ等しい計算結果が得られた. 導波管でのモード成分の割合は $TE_{2,2}$ モードが 89%, $TE_{0,2}$ モードが 9%, $TE_{1,3}$ モードが 2%であるという結果を得た. このことから, 導波管出口では $TE_{2,2}$ モードが支配的であることがわかった.

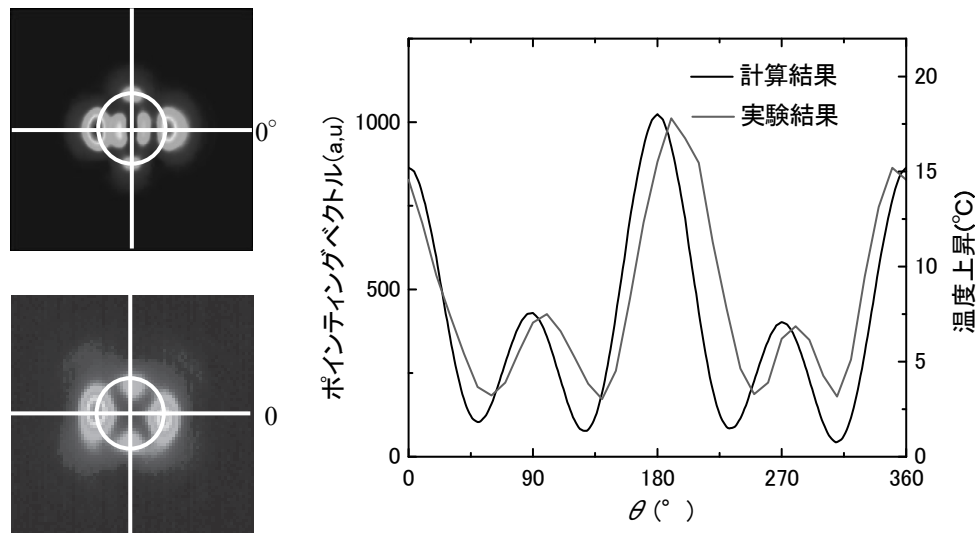


図 6-3 放射パターンの中心からある半径の方位角に対する分布の比較(3)

7. $TE_{2,2}$ 用ブラゾフランチャークからの放射ビーム

前節の 6-2 結果より導波管の出口で電磁波に含まれる割合が最も高いモードは $TE_{2,2}$ であることが分かった. そのことからアンテナ系を設計するなら, $TE_{0,2}$ 用よりむしろ $TE_{2,2}$ 用のブラゾフランチャークを用いれば, 電磁波が高い割合でガウスビームに変換されるはずである. そこで, $TE_{2,2}$ 用のブラゾフランチャーク (図 7-1) を製作し, ジャイロトロンの接続して, ブラゾフランチャークからの放射パターンを測定した. そのときの配置を図 7-2 に示す. 吸収板は水平に置き, 真上から赤外線カメラで撮影した. 放物鏡の高さの中心位置から吸収板までの距離を d とすると, $d = 180 \text{ mm}$ における測定結果を図 7-3 に示す. 図 7-3 から一か所に強い温度上昇を観測できた. この図 7-3 に対して x 方向, y 方向の温度上昇分布を図 7-4(x),(y) にそれぞれプロットする. またこれらの分布に対して, ガウス関数フィットした図

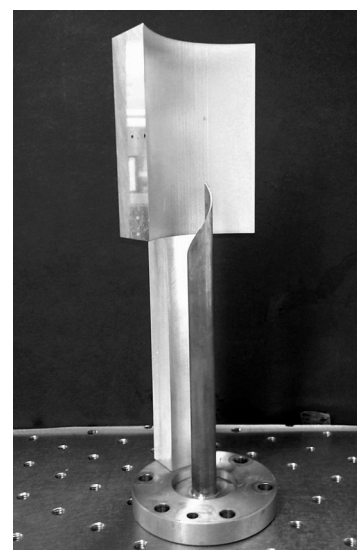


図 7-1 $TE_{2,2}$ 用ブラゾフランチャーク

も同様に図 7-4(x), 7-4(y) に示す. 図 7-4 から確かに温度上昇分布がガウス関数

上に乗ることが分かる．このフィットしたガウス関数を $G(x)$ ， $G(y)$ とする．赤外線カメラは一素子当たりの温度上昇としてデータを出力するので，カメラと観測体の距離の関係から赤外線画像の縦横の実際の長さが分わかり、横の 320pixel に対応する長さを l とすると、単位面積当たりの pixel 数は $(320/l)^2$ となる．1 pixel 当たりの温度上昇を全素子分足した値を T_{total} とするとガウスビーム成分は、

$$\text{ガウスビーム成分(\%)} = \frac{\int AG(x)G(y)dxdy}{T_{\text{total}} \times (320/l)^2} \times 100 \quad (7-1)$$

で計算できる (A は定数)．図 7-3 のガウスビーム成分を求めると約 60% という結果を得た．

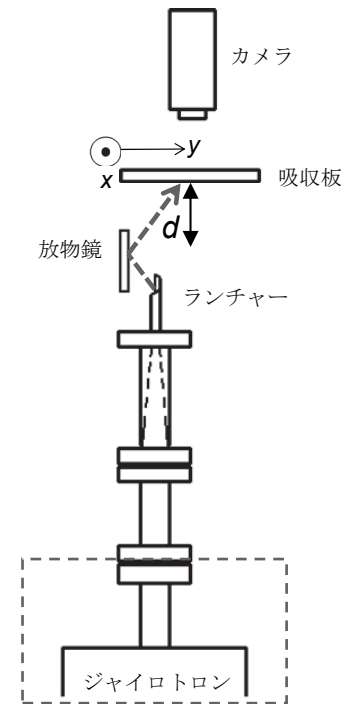


図 7-2 プラズマランチャーからの測定図

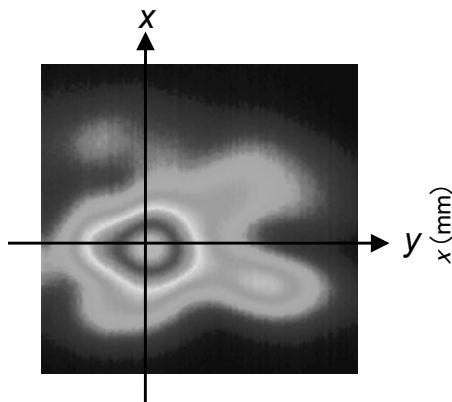


図 7-3 ランチャーからの測定結果

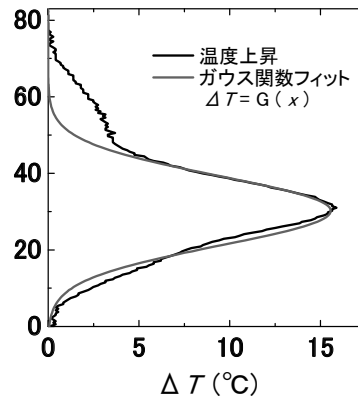


図 7-4(x) x 方向に対する温度上昇分

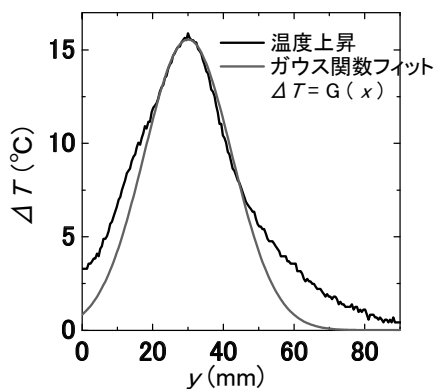


図 7-4(y) y 方向に対する温度上昇

8. まとめ

Gyrottron FU CW VIIA の $TE_{0,2}$ モード発振において真空窓からの放射パターンから真空窓出口における電磁波モードの解析を行った．その結果 $TE_{0,2}$ モードが 98%， $TE_{2,2}$ モードが 2% の割合で存在していることがわかった．同様に真空窓の上に接続した導波管からの放射パターンから導波管出口における電磁波モードの解析を行った．その結果 $TE_{2,2}$ モードが 89%， $TE_{0,2}$ モードが 9%， $TE_{1,3}$ モードが 2% の割合で存在していることがわかった． $TE_{2,2}$ モードが支配的になることから $TE_{2,2}$ 用のブラゾフランチャーを製作し，ビーム形状の変換を行った．放射パターン計測から放射に含まれるガウスビーム成分は約 60% であった．

今後は，この得られたビームを ESR 装置まで持っていくためのミラー設計をするとともに，モードの割合が途中で大きく変わる原因を探る予定である．

9. 参考文献

- [1] 酒井俊彦: Gyrottron FU CW VIIA から放射される電磁波のモード解析
(福井大学工学部卒業論文，2011)